第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟研究

刘金苗[1]， 李菊艳[2]， 尹忠东[1]， 关含笑[3]， 张家伟[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 喀什大学生命与地理科学学院，新疆 喀什 844000）

摘 要：植物固沙是荒漠地区防治风沙灾害的重要措施之一，骆驼刺（*Alhagi camelorum*）作为典型荒漠植物具有重要的应用价值。利用fluent软件对30 cm高度干枯骆驼刺附近的流场进行数值模拟，分析风速特征和积沙特征，并加以野外试验验证。结果表明：（1）植株附近流场大致可分为遇阻减速区、抬升加速区、紊流减速区以及恢复区。植株后会形成微弱的涡流，涡流的回流区高度与距植株远近有关，但整体低于0.14 m。（2）当风速为6 m·s^{-1}时，植株主要影响0.6 m高度以下的水平风速。植株后一定距离内的水平风速随高度增加不在呈现严格的对数分布，而是存在2个极小值，并在0.3~0.6 m高度范围内以较大的加速度快速增大。（3）植株的防风效率整体呈现出随风速增大而减小的规律，且该现象随高度增加愈加明显。当风速由6 m·s^{-1}增大至10 m·s^{-1}时，株后5.3 m范围内，0.3 m高度处的防风效率由40%减小至16.56%。（4）植株附近的积沙因风速的不同具有差异，当风速较小时，积沙主要集中在前方植株附近以及植株之间，随着风速的增大，积沙后移。

关键词：防风固沙；流场分布；数值模拟；骆驼刺；涡流

受干旱半干旱气候的影响，风沙流成为我国西部荒漠地区近地表物质运动的主要表现形式[1]，其进一步发展极易导致干旱半干旱地区生态恶化，引起风沙灾害[2]，在这一灾害中，地面沙粒构成了物质基础，风提供塑造地表的动力条件，也是风沙灾害的直接动力来源[3-4]。植被以其综合优势在覆盖地表、分解风力、阻挡输沙等多方面对地表土壤风蚀和风沙流结构产生影响[5-6]，植物固沙技术作为一种可以长效改善荒漠化的措施，在防风固沙技术中占据主导地位。

目前，对植物防风固沙效益的研究主要采用3种方法，一是传统的野外观测，二是模拟实验，包括风洞模拟实验和数值模拟实验，三是基于遥感-地理信息系统的研究。数值模拟仿真技术可以大大减少实验工作量，同时获取野外试验难以获取的数据，随着近些年的不断发展，被广泛应用于流体力学、风沙物理学以及风沙环境等多种领域。利用数值模拟研究植物防风固沙主要通过2种模型，一种是多孔介质模型，主要应用于森林、防护林的流场研究，例如毛泽魁[7]利用多孔介质模型，对森林影响下的风场分布特征进行模拟，唐朝胜等[8]探讨了橡胶防护林的防风效应，这一类研究主要是针对风场变化进行分析，对于沙粒的移动与沉降关注较少。另一种是采用实体几何直接开孔建立模型，多应用于对植株[9-10]以及植物沙障（草帘沙障、草方格沙障、芦苇沙障等）[11-13]防风阻沙性能的研究，例如来风兵[9]模拟研究了单株胡杨（*Populus euphratica*）周围流场结构特征，陈柏羽等[13]根据芦苇（*Phragmites australis*）形态特征，建立简化模型，分析芦苇沙障周围风速变化及积沙分布特征，并得到了合理布设间距。

骆驼刺（*Alhagi camelorum*）是一种典型的荒漠植物，其根系发达，生命力顽强，是我国西部荒漠区最常见的防风固沙植物之一。骆驼刺以单株或者灌丛的形式存在，不同区域骆驼刺的大小具有差异，较大的骆驼刺灌丛会使大量沙粒沉降堆积，经过长时间的风沙活动形成灌丛沙堆。每年5—7月是骆驼刺的生长旺季，进入生长季的骆驼刺，新生

收稿日期：2022-04-10； **修订日期：**2022-06-01
基金项目：新疆水土保持监督管理项目（213031003）
作者简介：刘金苗（1997-），女，硕士研究生，主要从事自然地理方向研究. E-mail: 15254173069@163.com
通讯作者：尹忠东. E-mail: 275911308@qq.com

枝芽在前一年枯死的旧枝根部重新发出,枝叶密度增加,高度和冠幅增大,区域的植被覆盖度相应增大,8月以后植株的木质化过程使得地上部分在冬季干枯后,除末端细小碎枝脱落外,大部分枝条直立不倒,直立的植株可以消耗风动量,减小剪切力,虽然春季活体骆驼刺植株非常有限,但枯立的植株仍然可以产生良好的防风阻沙效果[14-17]。根据野外调查,本文研究区春季干枯骆驼刺平均高度为30 cm左右,分布方式为零散分布,研究表明,风沙运动中沙粒的运输主要集中在近地表30 cm内[18-20]。通过数值模拟,对典型荒漠地带春季干枯骆驼刺对近地表处风沙活动的影响进行研究,分析植株附近流场的变化,并利用野外试验对模拟结果进行验证,为利用骆驼刺乃至植物措施防风治沙提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

野外试验在中国科学院策勒沙漠研究站实验观测场进行。策勒站位于策勒县,在塔里木盆地南缘1400 km风沙线上。策勒县位于新疆西南部,昆仑山北麓,塔克拉玛干沙漠南缘,地理位置为35°18′~39°30′N、80°03′~82°10′E。气候为极端干旱性大陆荒漠气候,干燥,昼夜温差大,日照时间长;水资源短缺,年平均降水量35.1 mm,年潜在蒸发量2595.3 mm,水资源补给以昆仑山区融雪为主;年均气温11.9 ℃,极端高温41.9 ℃,极端低温−23.9 ℃,无霜期209 d。生态系统脆弱,沙漠、戈壁面积达95%,自然植被以多年生荒漠植物为主,呈斑块状分布,有骆驼刺、花花柴(*Karelinia caspia*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)等混生群落,总盖度小于15%[21]。由于策勒处于塔里木盆地两大主导风向(NW、NE)的下风区域,全年盛行西北风,风沙活动频繁,沙尘日数多。年平均风速1.9 m·s^{-1},年均8级以上大风为3~9次,年起沙风次约90 d,土壤质地轻且易形成风沙流,沙尘暴天气高发,最多可达59 d,扬沙、浮尘天数达240 d。由于春季气温回升快,冷空气活动频繁,该时期风沙活动尤为强烈[22-23]。

1.2 数值模拟方法

1.2.1 几何建模和网格划分 基于前人对植被以及植物沙障的建模研究[9-13],本文尝试建立春季干枯状态骆驼刺的简化模型,由于多孔介质模型参数不易设定,因此采用实体开孔模式,直接建立孔隙几何模型。风沙流是沙粒在多种作用力下的三维运动现象,根据沙粒在运动过程中主要受重力和拖拽力,作用力基本处于同一平面上,因此建立二维简化模型。综合考虑野外试验和本文的研究内容,进行合理试算,计算流域长度设置为20 m,高度为3 m,满足流场发展要求;骆驼刺模型高30 cm,顶部距上边界2.7 m,按照形态进行简化,经多次建模模拟,对比计算量及计算结果得到植株模型,在距离入口5 m和6 m处各放置1株,流场模型简图如图1所示。

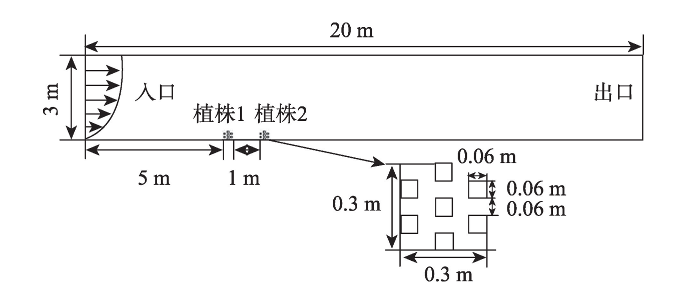


图1 流场模型简图

Fig. 1 Model diagram

模型计算域网格划分类型采用四边形网格(Quad),划分方法采用结构化网格划分。由于风沙流受边界层的影响较大,沙粒主要集中在近地表处,因此对近地面以及植株附近的网格进行局部加密。近地面划分20层边界层网格,植株两侧划分16层边界层网格,第一层网格尺寸设置为0.015 mm,左右以1.05的比例递增。计算域共划分网格数量为19500个,最小正交质量(Minimum Orthogonal Quality)远远大于0.99,最大正交歪斜率(Maximum Ortho Skew)远远小于0.001,网格质量良好,满足计算要求(图2)。

1.2.2 边界条件和计算参数 根据流体马赫数小于0.3时为不可压缩流的空气动力学原理,风沙流为不可压缩流。计算域左侧风速进口边界条件为速度入口(Velocity-Inlet),风速计算见公式(1);由于出口

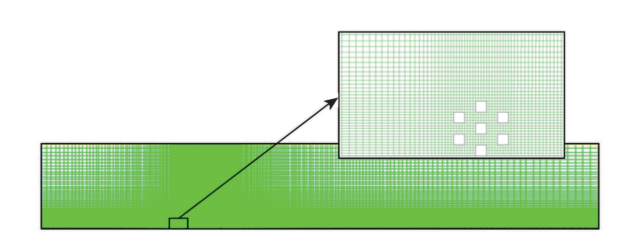


图2 计算区域网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid division of computing area

流速和压力均未知，且流动完全发展，因此右侧边界出口条件为完全发展自由出口（Out-Flow）；对称面上不存在扩散通量，计算域上壁面边界采用对称边界（Symmetry），可以在保证精度的条件下，加快计算速度；植株模型和地面即下壁面边界采用固体无滑移边界（Wall），粗糙度取0.002 m[24-25]。

介质沙粒为稀相，风沙流携沙粒径一般为0.075~0.25 mm，将沙粒近似为单一的颗粒球模型，沙粒粒径 ds=0.1 mm，初始沙粒体积分数为0.02%，类型为流体（Fluid）[26]。沙粒密度 ρ_s=2650 kg·m^{-3}，黏度 μ_s=0.047 Pas。空气密度 ρ=1.225 kg·m^{-3}，空气运动黏度 μ=1.7894×10^{-5} Pas，压力为标准大气压，重力加速度 g=9.8 m·s^{-1}。入口边界速度为典型风速廓线流：

$$v(y)=\frac{v_0}{k}\ln\frac{y}{y_0} \tag{1}$$

式中：v_0为摩阻速度；y_0为粗糙长度；k为冯卡门系数，取值为0.4；y为高度；$v(y)$为y处的风速值。

采用欧拉双流体模型，附加湍流模型。气固相之间采用Schiller-naumann计算相互间阻力。由于需要观测流场随时间的变化情况，故采用非定常的瞬态求解方法来模拟，空间离散格式采用二阶迎风格式，时间步长取0.001 s，流场求解采用SIMPLE算法。

1.2.3　控制方程　由于风沙流之间热量交换可忽略不计，故不涉及能量方程。本文模拟气流为不可压缩流，模拟包含的控制方程主要有连续方程、动量方程和湍流模型方程。标准k-ε模型的稳定性、经济性和计算精度均较高，使用范围广泛，适合高雷诺数的湍流使用，满足本文的计算要求。该模型需要求解湍动能及其耗散率方程，湍动能运输方程是通过精确的方程推导得到，但耗散率方程是通过推理以及数学上模拟相似原形方程得到。湍动能k和耗散能ε方程如下：

湍动能k方程：

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{2}$$

耗散能ε方程：

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3}$$

式中：湍流黏度 $\mu_t=\dfrac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$，$C_\mu$ 为经验常数；G_k表示由于水平速度梯度引起的湍动能；G_b表示由于浮力影响引起的湍动能；t为时间；x_i、x_j分别表示x、y方向的微元体分量；$C_{1\varepsilon}=1.44$；$C_{2\varepsilon}=1.92$；$C_{3\varepsilon}=0.09$；$\sigma_k=1.0$；$\sigma_\varepsilon=1.3$。

1.2.4　防风效率　通过防风效率来反映植株对气流的削减作用，公式如下：

$$\eta_{xz}=\left(1-\frac{v_{xz}}{v_z}\right)\times100\% \tag{4}$$

式中：x为距植株的水平距离；z为距地面高度；η_{xz}为(x,z)处的防风效率；v_{xz}为气流经植株后在(x,z)处的风速值；v_z为未经植株在z高度处的初始风速值。

1.3　野外现场试验设计

为了验证模拟的可靠性，在中国科学院策勒沙漠研究站实验观测场开展野外试验。试验时间为3—5月，此时该地区气温回升，风沙活动尤为频繁。选择零散分布自然生长于枯骆驼刺的沙地以及无植被生长的裸沙地布设样地，样地大小为6 m×6 m，其中骆驼刺样地以骆驼刺为中心建立，并保证该样地内有且只有2个沿主风向分布的间距为1 m的植株。在两植株中间位置以及裸沙地样地中心布设集沙仪（图3）。集沙仪设置16个集沙盒，每个集沙盒口径为1.5 cm×3 cm，收集距地表0~48 cm高度内的沙粒。集沙仪的开口与观测期间风向正对，其底部与地面齐平。集沙时长为24 h，开始集沙时打开集沙仪进沙口，集沙结束后将其关闭并将收集到的沙粒带回实验室，用精度天平进行分层称重。

输沙率表示在一定风速和沙源条件下，地表的输沙能力[27]。为表述统一，本研究使用输沙率作为描述单位时间、单位面积风蚀物质量的物理量，单位采用g·m^{-2}·min^{-1}。假设某个高度处的集沙盒在某一时间段T(min)内收集的沙子质量为m(g)，则输沙率Q为：

$$Q=\frac{m}{ST} \tag{5}$$

式中：S为集沙盒入口面积，取值为0.00045 m^2。

2　结果与分析

2.1　流场模型合理性验证

俞明聪[28]的研究表明，风沙运动中沙粒体积分数与输沙率的分布情况一致。本文利用野外试验得到的输沙率数据作为对照，通过数值模拟获取植株1背风侧0.5 m处沙粒体积分数随高度的变化规

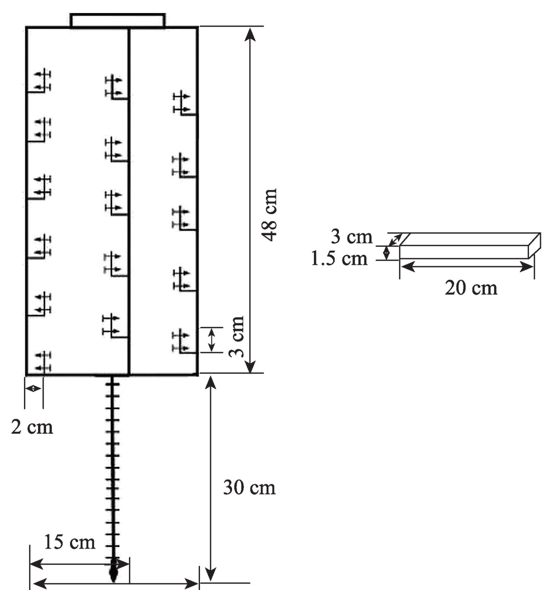




图3　集沙仪

Fig. 3　Sand sampler

律，两者进行对比验证。图4、图5显示，植株后输沙率和沙粒体积分数随高度的分布基本一致，在15~24 cm高度处两者均出现波动，呈现出先增大后减小的规律，形成此现象的原因与植株在不同高度处的防风效率不同有关，同时，植株后的涡流效应可能会产生一定的影响。就野外试验得到的输沙率而言，相较于裸沙地近地表处的输沙率，骆驼刺后0.5 m处30 cm高度以下的输沙率大大降低，其阻沙能力良好。验证结果总体呈现较好的一致性，因此数值模拟中流场设置相对合理可靠，后续将采用相同的流场设置进行模拟。

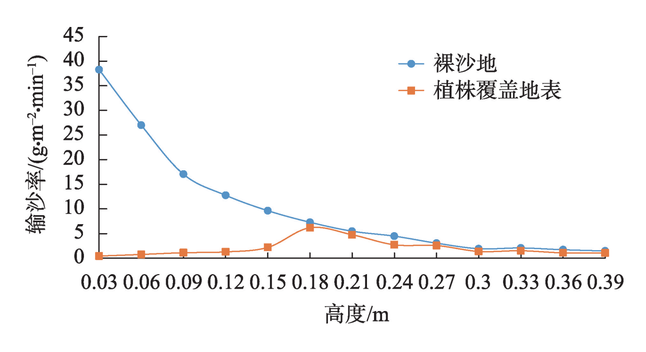


图4　输沙率随高度变化(野外试验)

Fig. 4　Variation of sediment transport rate with height (field test)

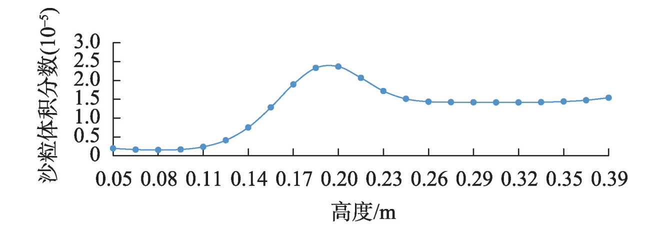


图5　沙粒体积分数随高度变化(数值模拟)

Fig. 5　Variation of sand volume fraction with height (numerical simulation)

2.2　干枯骆驼刺植株周围流场特征

为研究植株影响下的流场特征，选择高度2 m处风速为6 m·s^{-1}的风速廓线进行模拟(下文速度未作特别说明均为2 m高度处的风速)，流场变化云图如图6所示。从图6可以看到，植株明显改变了流场的分布，气流形成分区，为遇阻减速区、抬升加速区、紊流减速区、恢复区。在植株1前1 m范围内，受植株的阻碍作用，气流随靠近植株速度逐渐减小；植株1处，气流产生汇聚并受到抬升，植株1上方风速增大，50 cm高度处的风速由4.63 m·s^{-1}增大至5.01 m·s^{-1}，增大8.21%，而植株2在植株1的有效防护距离内，其上部并没有形成明显的加速区；植株1、2之间以及植株2之后一段距离内风速减小，形成明显大范围的紊流减速区，该区域内沙粒所获动能减小，易形成沉积；随着气流逐渐远离植株区域，气流受到的扰动作用减弱，速度逐渐恢复。

气流在植株处受到挤压，越过植株后，产生分离，过流断面增大，由于能量差异，形成向下运动的分流，靠近地面处的气流返回入口方向，从而形成

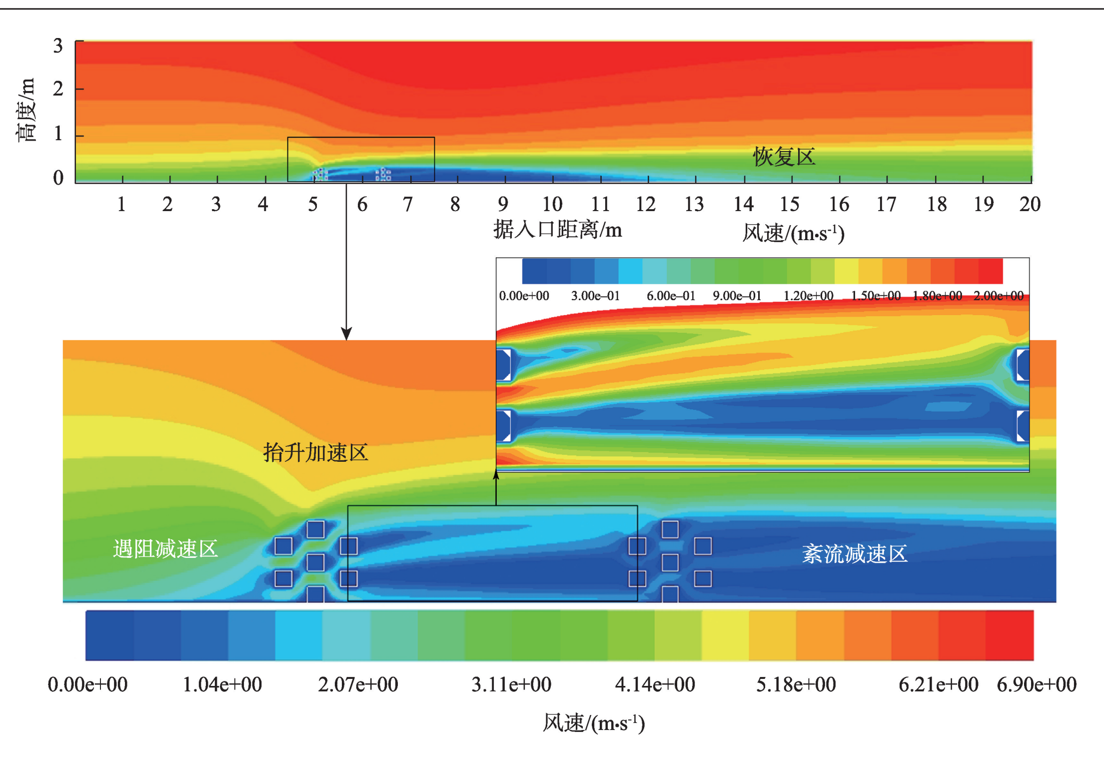


图6 植株周围风速云图

Fig. 6 Cloud chart of wind speed around the plant

了回流，即在植株背风侧减速区产生反向气流，形成涡流现象，但由于植株具有良好的疏透度，该现象并不是特别明显。由图7可知，流场内形成3个主要涡流区域：涡流1处于两植株之间的区域，涡流2处于植株2至距入口7.8 m处，涡流3处于7.8 m至距入口10.5 m处，3个回流范围均较大，而强度均较小。涡流3产生的原因可能是受涡流2末端的影响，气流再次受到挤压后形成了微弱的涡流，其后气流逐步恢复。在涡流区域，沙粒会被分成两部分，一部分沙粒随气流回流并逐步沉积，另一部分

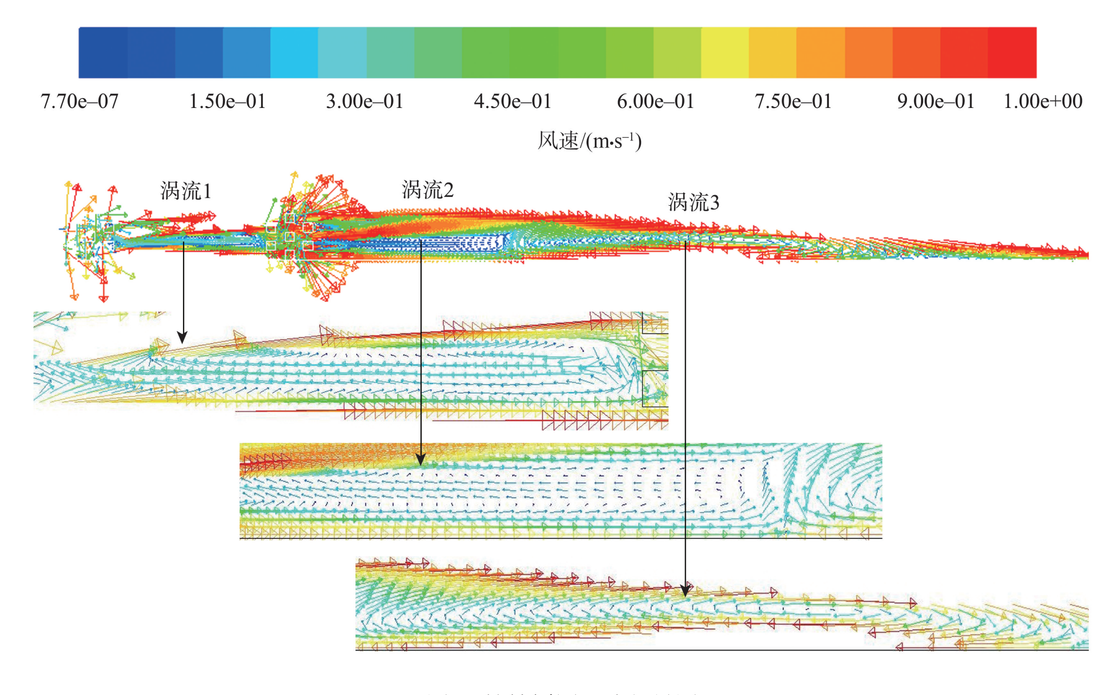


图7 植株周围风速矢量图

Fig. 7 Vector diagram of wind speed around the plant

随涡旋气流进入气流主流区离开。回流区的范围越大、强度越弱，越多的沙粒会沉积在植株附近，阻沙能力越强，这也反映出植株在防风阻沙方面远优于无孔隙度的障碍物。

2.3　干枯骆驼刺植株的防风效果

2.3.1　速度分布特征　以6 m·s^{-1}为入口风速，风速方向为正向，提取0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m、1.5 m高度处风速的水平速度分量绘制沿程分布图，其中，植株实体位置处风速取值为0。由图8可知，1.5 m高度处的水平风速一直处于稳定状态，其他5个高度处的气流受到了不同程度的扰动。0.4 m、0.5 m处的水平风速在植株前先略微减小，经植株抬升速度增大后，越过植株后平稳减小，最终在距入口14 m后逐渐恢复到初始风速。0.4 m处水平风速沿程最大增加7.87%，最大可以降低39.93%，0.5 m处则分别为8.29%、17.99%，增幅接近，降幅则呈现越靠近地面越大的规律。在等于或低于植株的高度处(0.1 m、0.2 m、0.3 m)，气流受到的扰动增加，水平风速在越过植株后呈现出不同的变化规律。首先，不存在明显高于初始水平风速的阶段，即风速沿程整体呈现出被削减的状态，这与在低于植株的高度内产生了有效的防护有直接关系。当风速减小至负值时，表明此处产生回流，附近范围内会有涡流形成，0.1 m高度处的气流在较大的范围内存在回流现象，该高度附近是涡流现象的主要回流区，沙粒的沉降也主要在该高度内发生。其次，气流2次越过植株后，水平风速均呈现“W”型分布，在两植株之间，风速运行较为稳定。总体而言，除植株处，各高度水平风速沿程变化整体较平缓，无剧烈扰动，同时在较大范围内低于入口风速，有利于抑制风沙流，促进沙粒沉降。

以6 m·s^{-1}为入口风速，在距入口4.5 m、5.6 m、6 m、7.2 m、7.8 m、10 m处取垂直截面，绘制水平风速分量随高度分布图。从图9可以看到，4.5 m处的水

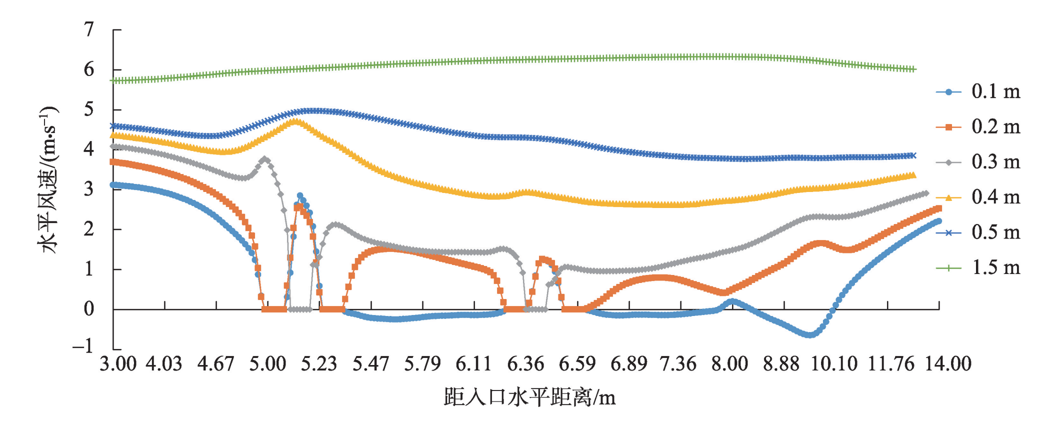


图8　不同高度气流水平速度分量沿程分布

Fig. 8　Distribution of horizontal airflow velocity components at different heights

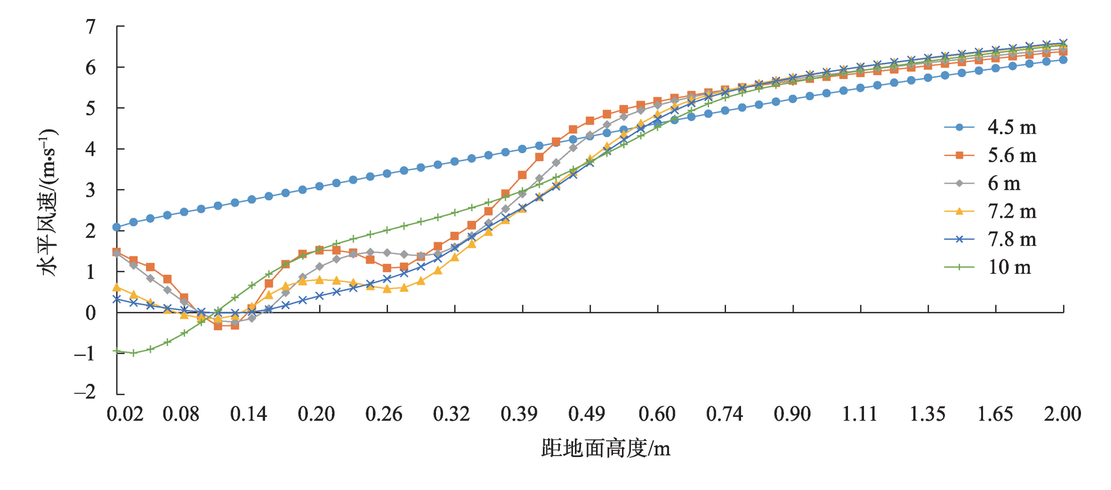


图9　不同高度气流水平速度分量沿高分布

Fig. 9　Distribution of horizontal airflow velocity components along different heights

平风速基本以较为平稳的趋势增加，该位置处于植株1前0.5 m处，气流受植株影响相对较小，变化的幅度也相应的较小。5.6 m、6 m处于两植株之间，7.2 m处于植株2后0.6 m处，3个位置处的水平风速在0.6 m高度以下均呈"W"型分布，随着高度的不断增加，水平风速不断减小至负值，即出现回流，负值主要存在于0.08~0.14 m高度内，并在0.12 m附近出现第1个极小值，即5.6 m、6 m、7.2 m处分别为：−3.3 m·s^{-1}、−0.23 m·s^{-1}、−0.15 m·s^{-1}；随着高度增加，水平风速增加后再次减小，并在0.27 m附近达到第2个极小值（1.09 m·s^{-1}、1.39 m·s^{-1}、0.58 m·s^{-1}），该处并未产生回流。10 m处的水平风速整体呈现随高度增加而增加的规律，以0.1 m高度为节点，其下为回流，其上为正向流动，这正是上文分析的较大范围的涡流3。总体而言，0.6 m高度是风速发展的重要分界点，其下风速先被减小，到达0.3~0.6 m处再以较大的加速度发展，其上风速几乎不受植株的影响，风速恢复对数分布，各位置风速达到一致。因此，植株的防护高度为0.6 m，同时0.3~0.6 m内风速急剧加速的现象值得引起注意。

2.3.2 *植株的防风效率* 风沙流的运动过程中沙粒主要集中在近地面0.3 m高度内，因此选取风速为6 m·s^{-1}、10 m·s^{-1}时，0.1 m、0.2 m、0.3 m 3个高度处的防风效率进行研究。图10显示，不同风速下防风效率整体呈现出随着远离植株下降的趋势。当入口风速为6 m·s^{-1}时，株后5.3 m范围内，0.3 m高度以下的防风效率均高于40%，各高度处风速在距离植株7.4 m处接近，为30%左右；0.1 m高度处的防风效率整体较高，尤其是在距植株3.9 m范围内，总体高于80%，在植株后1.2~1.6 m、2.8~3.2 m处出现波动，5.5 m后降低到50%以下；0.2 m高度处的防风效率在1.3 m范围内先减小后增大，1.3 m后防风效率逐渐减小并在1.75 m处开始低于80%，植株后5 m降低到50%。相较于0.1 m、0.2 m处，0.3 m高度处的防风效率呈现出随远离植株更为稳定的减小趋势，防风效率低于80%，并在2.7 m处降低到50%以下。当入口风速为10 m·s^{-1}时，0.1 m高度内的防风效率在近距离内良好，但4.26 m后迅速减小，0.2 m、0.3 m处也有类似的变化规律；株后5.3 m范围内，0.2 m高度以下的防风效率均高于30%，0.3 m处减小到16.56%。总体而言，风速增大，植株的防风效率减小，且该现象随高度增加愈加明显；当风速较小时，植株的防护范围较大，防风效率较高，当风速较大时，贴近地面处防风效率较高，但在达到某一距离后其减小速率增大，植株较快的失去有效的防护，防护范围也相应减小。

2.4 干枯骆驼刺植株周围积沙特征

风是沙粒运动的直接动力，风速的改变直接影响沙粒的运动状态。受植株的影响，一方面风速减小，沙粒沉降，另一方面，运动的沙粒遇植株受阻，形成积沙。为研究不同风速条件下植株对积沙的影响，取入口风速为6 m·s^{-1}、10 m·s^{-1}、20 m·s^{-1}，模拟得到t=4 s、t=10 s不同风速条件下的积沙云图（图11）。从图11可以看到，不同风速条件下，随着运动时间的增加，积沙会不断增加，并在某一时刻达到该风速下的稳定状态。当入口风速为6 m·s^{-1}时，沙

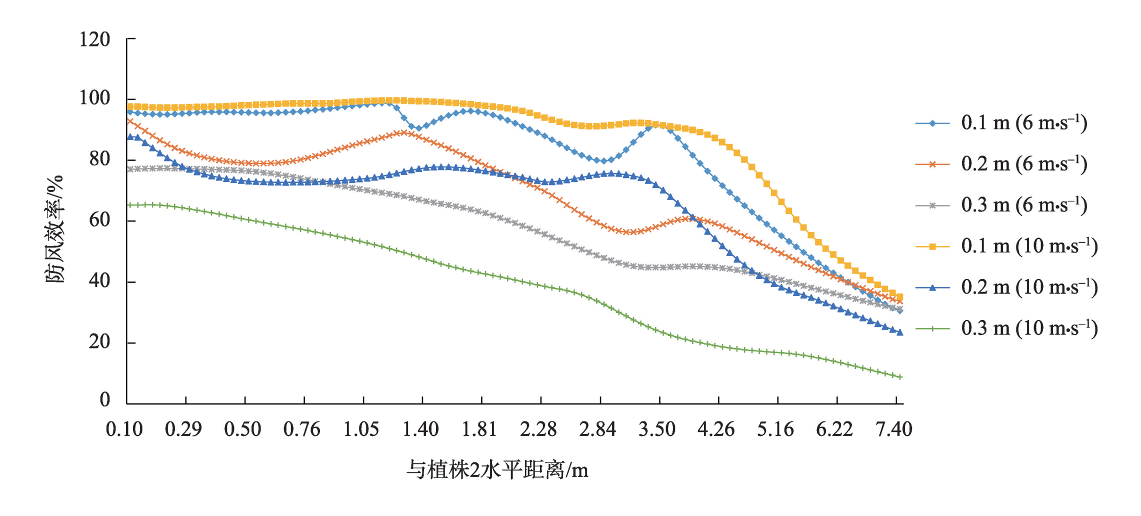
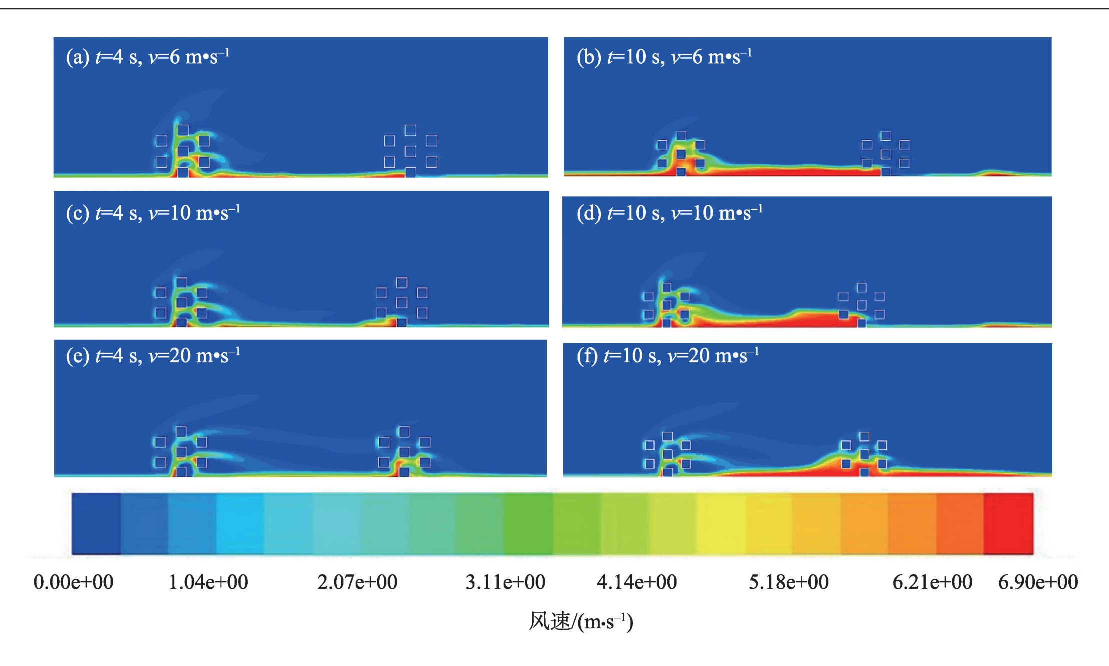


图10 防风效益

Fig. 10 Protection benefit



注：不同的体积分数通过颜色区分；红色为最大值，表示沙粒在该处有沉积现象；蓝色为最小值；其他颜色代表沙粒以一定的形式（蠕移、跃移、悬移）进行运动。

图11　植株周围积沙云图

Fig. 11　Sand accumulation cloud atlas around the plant

粒先在植株1附近、植株2迎风侧处沉积，随后在植株1处及两植株之间不断积累，植株1附近的积沙明显大于植株2附近的积沙，这是由于气流遇植株1受阻、风速降低、搬运沙粒能力下降导致的，与前文风速分析结果相对应。当入口风速为10 m·s^{-1}时，同样是在植株1附近及两植株之间形成积沙，但当t=10 s时，植株1附近的积沙相较于同时刻入口风速为6 m·s^{-1}时减少，更多的积沙出现在植株2前。随着入口风速增加到20 m·s^{-1}，在2个时间点均呈现植株2处形成更多的积沙的现象，尤其是当t=10 s时，植株1附近的积沙与t=4 s时无明显差别，均存在少量积沙，而植株2前后形成大量积沙，甚至形成小沙堆。分析其原因如下：风沙流经过植株时气流速度发生明显改变，当风速较小时，植株1的削减作用，使其前后一定范围内的流速降低到起沙风速以下，风沙流处于过饱和状态，沙粒沉降堆积，但当风速较大时，虽然植株1对风速有削减，但减弱能力有限，风速仍大于起沙风速，风沙流处于非饱和状态，仅小部分沙粒受阻沉积，大部分沙粒继续运动，植株2对气流形成二次削减，附近风速大大降低，此时大量沙粒沉积，形成积沙，同时，植株2后较大范围的回流也促进了沙粒的沉积。

研究显示，植株具有良好的阻沙能力。在野外，随着时间的推移，不同速度风沙流交替运行，植株附近沙粒不断堆积，植物也通过生理作用适应风沙活动，经过长时间的相互作用，植株附近形成沙堆，也就是常说的灌丛沙堆。灌丛沙堆或大或小，从几十厘米到几米不等，这与植株的大小、风沙活动的强弱、当地环境特征等多种因素有关。由于野外风速多变，较小风速下，前面的植株可使沙粒沉降，但当风速较大时，则需要后面的植株进行叠加作用，因此多植株比单植株更易形成灌丛沙堆，且其会受到植株布局的影响。通过栽种植物或者利用类似于植株的材料进行防风治沙时，要考虑到区域的风速特征，在易形成高风速风沙流的地区，应尽量布设双行甚至多行来达到较好的效果。

3　讨　论

引起风沙灾害、影响土壤风蚀强度的因素有很多，包括风场、土壤性质、地表条件等，植被覆盖是地表条件的主要影响因子之一。由于区域内风场、土壤性质具有固定性，利用植被改变地表条件以达到防风固沙、抑制风蚀的目的是十分有效的措施，因此对植被影响下流场特征的研究尤为关键。但是，由于植被及其影响下的地表极其复杂，不同覆

盖度、高度、树冠疏透度、配置模式的植被对地表物质条件及风速的影响均有差异[29]，使得该研究十分困难。

植被主要通过2个机制对风沙活动产生影响，学者们根据侧重点不同，针对这2个方面分别展开研究。一方面，植物改变风场特征，降低风速，同时对沙粒造成阻碍，沙粒沉降。徐高兴等[30]通过风洞试验，模拟了4种配置模式下梭梭林(*Haloxylon ammodendron*)的固沙效果，研究表明不同配置模式会影响流场运行特征，改变固沙效果，但当植被覆盖度达到32.37%时，各配置模式下梭梭林的固沙效果差异不显著。对于小型灌木，受植株形态的影响，枝下高度大的植株形成的“狭管效应”会加速地表的风蚀作用，形态低矮且疏透度小的植株防风阻沙效果更明显，有效防护距离更大[31]。另一方面，植物通过生物作用使土壤形成有机质层，固定土壤，减小地表剪切力，提高地表起沙风速，降低沙粒流动幅度，从而达到防风固沙的效果。王佳庭等[32]对乌兰布和沙漠不同植物群落影响下，土壤可蚀性因子的研究发现，不同沙地可蚀性颗粒含量、有机质含量、土壤结皮因子、土壤含水率受植被影响存在差异，梭梭、白刺(*Nitraria tangutorum*)等灌木植物群落比沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等草本植物群落更能降低土壤风蚀作用；吴楠等[33]的研究表明，植物作用下土壤有机质、养分促进土壤结皮的形成和发育，使土壤具备更强的蓄水能力和抗风蚀能力。数值模拟的方法可以较好地反映出植株第1个防风阻沙机制的防护效果，但难以综合反映植物的生物作用。

不同物候期，植株的冠层形态、茎枝柔韧性、叶面积以及由此导致的地上生物分配模式具有差异，其阻沙能力不尽相同[34]，而灌木植株附近沙堆的高度受植物高度的控制，沙堆的半径受冠幅的控制，沙堆的生长发育受形态参数的影响[35]。基于生长季骆驼刺与非生长季骆驼刺在高度、冠幅及孔隙度方面的差异[31]，本文的植株模型通过较小的高度和冠幅、较大的孔隙来表现非生长季骆驼刺的形态具有一定的可靠性。后续研究中需优化生长季骆驼刺植株模型，同时考虑植物生物作用以及野外非定常来流因素的影响，以获得更全面、准确的结果。同时，模拟结果显示出2个植株附近这一极小尺度下流场的运行情况，大尺度背景下不同覆盖度植株的协同作用是另一项重要的研究内容[36]，2个尺度关系密切，小尺度环境影响大尺度流场的运行，大尺度又可进一步反映小尺度，因此进行相关研究对建立两者相互佐证十分关键。

4 结 论

本文对30 cm高度骆驼刺的形态进行简化，建立二维模型，运用数值模拟的方法对风沙流经过植株后的风速特征和积沙特征展开研究，并利用野外试验验证其可靠性，研究结论如下：

(1) 植株附近流场大致可以分为遇阻减速区、抬升加速区、紊流减速区和恢复区。植株周围会形成3个微弱的涡流，分别位于两植株之间、植株后1.2 m内以及1.2~2.7 m内。靠近植株处涡流的回流区主要存在于0.09~0.14 m高度内，远离植株处的回流区位于0.1 m以下。

(2) 当风速为6 $m\cdot s^{-1}$时，30 cm高度植株主要影响0.6 m以下的水平风速，在离开两植株8 m左右恢复到初始状态，植株附近的风速沿程呈“W”型分布。植株后一定距离内的水平风速随高度增加存在2次减小过程，并在0.3~0.6 m高度范围内，沿高度以较大的加速度增大后，逐步恢复至初始风速廓线状态。

(3) 植株的防风效率整体呈现出随风速增大而减小的规律，且该现象随高度增加愈加明显。由于植株具有良好的疏透度，其防风效率整体良好，防护距离较大，当风速为6 $m\cdot s^{-1}$时，植株后5.3 m范围内，0.3 m以下的防风效率高于40%，当风速增加至10 $m\cdot s^{-1}$时，该值减小至16.56%。

(4) 植株的阻沙能力良好。不同风速条件下，随着时间的增加，积沙会不断增加并达到稳定。当风速较小时，积沙主要集中在前方植株附近以及植株之间的区域，随着风速的增大，气流经多次削减后沙粒沉积，积沙有后移的趋势。

致谢：本次野外实验的数据获取得到了中国科学院策勒沙漠研究站的大力支持，对此表示衷心的感谢！

参考文献(References)：

[1] 杨兴华，李红军，何清，等. 塔克拉玛干沙漠荒漠过渡带春季风沙活动特征——以肖塘为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 915–

920. [Yang Xinghua, Li Hongjun, He Qing, et al. Blown sand sctivities in spring in the desert transitional zone of the Taklimakan Desert: A case in Xiaotang Area[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 915–920.]

[2] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东岸沙地风沙活动特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 49–56. [Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Characteristics of blown sand activities in sandy land on the eastern shore of the Qinghai Lake of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 49–56.]

[3] 王永胜, 杨文斌, 李永华, 等. 库姆塔格沙漠东缘荒漠绿洲过渡带风况及输沙势[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 140–144. [Wang Yongsheng, Yang Wenbin, Li Yonghua, et al. Wind regime and resultant sand-transporting potential in the desert-oasis ecotone in the eastern marginal zone of the Kumtag Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 140–144.]

[4] 梁晓磊, 牛清河, 安志山, 等. 甘肃瓜州锁阳城南雅丹地貌区起沙风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 48–55. [Liang Xiaolei, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Sand-driving wind regime and sand drift potential in the Yardang landform areas of southern Suoyang Town, Guazhou, Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 48–55.]

[5] 赵超, 徐向舟, 徐飞龙, 等. 实验地貌的动态观测装置[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 65–69. [Zhao Chao, Xu Xiangzhou, Xu Feilong, et al. A device to measure dynamic process of slope erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 65–69.]

[6] Caviezel C, Hunziker M, Schaffner M, et al. Soil-vegetation interaction on slopes with bush encroachment in the central Alpsadapting slope stability measurements to shifting process domains[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(4): 509–521.

[7] 毛泽魁. 多孔介质森林模型中流场分布特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Mao Zekui. Research of the Characteristics of Flow Field in a Porous Medium Forest Model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]

[8] 唐朝胜, 刘世洪, 程杰仁, 等. 基于数值模拟的橡胶防护林防风效应探讨[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 79–83. [Tang Chaosheng, Liu Shihong, Cheng Jieren, et al. Study on windbreak effect of rubber and protection forest based on numerical simulation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 79–83.]

[9] 来风兵. 塔克拉玛干西部别里库姆沙漠胡杨沙堆的空间格局及FLUENT流场模拟[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. [Lai Fengbing. Spatial Pattern and Fluent Flow Field Simulation of Populus euphratica Sandpile in Belikom Desert, Western Taklimakan[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017.]

[10] 任一凡. 基于双向流固耦合的林木风致响应及防风效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [Ren Yifan. Study on Wind-Induced Response and Windproof Effect of Trees Based on Two-way Fluid-structure Interaction[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]

[11] 孙浩. 草帘沙障周围流场特征及其地表演化过程研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. [Sun Hao. Research on the Characteristic of Flow Field Around Straw Sand Barrier and Surface Processes [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.]

[12] 夏先攀. 沙粒在草方格沙障内弥散特征的数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Xia Xianpan. Numerical Simulation of Dispersion Characteristics of Sand Particles in Straw Checkerboard Barriers[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[13] 陈柏羽, 程建军, 李生宇. 新疆S214省道高立式芦苇沙障合理间距分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 782–789. [Chen Boyu, Cheng Jianjun, Li Shengyu. Reasonable spacing of high-parallel reed sand barriers along the Xinjiang provincial highway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 782–789.]

[14] 王雪芹, 胡永锋, 杨东亮, 等. 绿洲-沙漠过渡带骆驼刺群落的防风阻沙作用[J]. 干旱区地理, 2011, 34(6): 919–925. [Wang Xunqin, Hu Yongfeng, Yang Dongliang, et al. Effect of *Alhagi sparsifolia* community on wind block and drift sand control in the oasis-desert ecotone[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(6): 919–925.]

[15] 董治宝, Donald W Fryrear, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 29–32. [Dong Zhibao, Donald W Fryrear, Gao Shangyu. Modeling the roughness effect of blown-sand-controlling standing vegetation in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(3): 29–32.]

[16] 冯筱, 李生宇, 徐新文, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带骆驼刺(Alhagi sparsifolia)群落的地表蚀积特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1252–1259. [Feng Xiao, Li Shengyu, Xu Xinwen, et al. Wind erosion and deposition features on surfaces under different coverage of *Alhagi sparsifolia* community in the oasisdesert ecotone in Cele, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1252–1259.]

[17] 毛东雷, 雷加强, 庞营军, 等. 新疆策勒县固定沙地骆驼刺带状平茬对地表蚀积变化的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 173–179. [Mao Donglei, Lei Jiaqiang, Pang Yingjun, et al. Influences of *Alhagi sparsifolia* stumping on sand surface erosion and deposition in Cele County of Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 173–179.]

[18] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究——试验介绍与观测结果初报[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 315–322. [He Qing, Yang Xinghua, Ali Mamtimin, et al. Observation of dust emission by wind erosion in Taklimakan Desert: Field experiment and preliminary report[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 315–322.]

[19] Bao Y, Ding G, Wu B, et al. Study on the wind-sand flow structure of windward slope in the Mu Us Desert, China[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(2): 1449–1454.

[20] 熊敏, 何清, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠平坦沙地风沙流结构的空间差异性研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 412–416. [Xiong Min, He Qing, Yang Xinghua, et al. The

spatial difference of wind sand flow structure over a flat sandy surface of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2017, 30(3): 412–416.]

[21] 毛东雷, 蔡富艳, 杨雪峰, 等. 新疆策勒绿洲——沙漠过渡带不同下垫面风场特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1117–1126. [Mao Donglei, Cai Fuyan, Yang Xuefeng, et al. Characteristics of wind filed over different underlying surfaces in the oasis-desert Ecotone in Qira, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1117–1126.]

[22] 毛东雷, 吴云霞, 蔡富艳, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 48–54. [Mao Donglei, Wu Yunxia, Cai Fuyan, et al. Spatial distribution of sand grain size on aeolian deposition of nebkhas and back vortex dunes in oasis- desert ecotone in Cele, Xinjiang[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 48–54.]

[23] 张鹤年. 塔克拉玛干沙漠南缘—绿洲过渡带生态环境区综合治理技术与试验示范研究[J]. 干旱区研究, 1995, 12(4): 1–9. [Zhang Henian. Study on comprehensive treatment technology and experimental demonstration of ecological environment area in the southern edge of Taklimakan Desert Oasis transition zone[J]. Arid Zone Research, 1995, 12(4): 1–9.]

[24] 张军平. 兰新铁路风沙流特征及防风挡沙墙优化研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011. [Zhang Junping. Study on Features of Sand Flow and Optimization of Windbreak Anti-sand Wall of Lanxin Railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2011.]

[25] 王德鑫. 双层防风挡沙墙的风沙两相流数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Wang Dexin. Numerical Simulation of Wind-sand Two-phase Flow in Double-layer Windshield Anti-sand Wall[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]

[26] 贾光普, 左合君, 王海兵, 等. 高立式尼龙网沙障周围风沙运动特性的数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 109–117. [Jia Guangpu, Zou Hejun, Wang Haibing, et al. Numerical simulation and experiment of wind-sand movement characteristics around high vertical nylon mesh sand barriers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 109–117.]

[27] 张伟民, 汪万福, 张克存, 等. 不同沙源供给条件下砾石床面的风沙流结构与蚀积量变化风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1015–1020. [Zhang Weimin, Wang Wanfu, Zhang Kecun, et al. Wind tunnel experiments on sand-laden wind structure and sand erosion-deposit budget over gravel bed under abundant and deficient sand supplies[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1015–1020.]

[28] 俞明聪. 风沙流对准朔铁路路堑响应规律及防风沙措施效果数值研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. [Yu Mingcong. Numerical Study on the Response Law of Wind Sand Flow to the Cutting of Jungar-Shuozhou Railway and the Effect of Wind Sand Prevention measures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.]

[29] 王晓东, 岳德鹏, 刘永兵. 土壤风蚀与植被防护研究[J]. 西部林业科学, 2005, 34(2): 108–112. [Wang Xiaodong, Yue Depeng, Liu Yongbing. A review of the research on soil wind erosion and vegetation prevention[J]. Journal of West China Forestry Science, 2005, 34(2): 108–112.]

[30] 徐高兴, 徐先英, 王立, 等. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 189–195. [Xu Gaoxing, Xu Xianying, Wang Li, et al. Sand-fix effects of *Haloxylon ammodendron* forests under the different densities and patterns under wind tunnel test[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 189–195.]

[31] 张奕, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(1): 87–96. [Zhang Yi, Xiao Huijie, Xin Zhiming, et al. Wind prevention and sand resistance of typical shrubs in Ulan Buh Desert[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 87–96.]

[32] 王佳庭, 于明含, 杨海龙, 等. 乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1543–1550. [Wang Jiating, Yu Minghan, Yang Hailong, et al. Soil erosibility of typical plant communities in Ulan Buh Desert[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1543–1550.]

[33] 吴楠, 张元明, 潘惠霞, 等. 古尔班通古特沙漠苔藓结皮中可培养细菌多样性特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 250–258. [Wu Nan, Zhang Yuanming, Pan Huixia, et al. Culture dependent bacteria diversity of moss crusts in the Gurbantunggut Desert[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(2): 250–258.]

[34] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 等. 植物阻沙能力研究进展[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 43–48. [Tang Yan, Liu Lianyou, Qu Zhiqiang, et al. Research review of capacity of plant for trapping blown sand[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 43–48.]

[35] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 浑善达克沙地3种典型灌丛固沙能力的比较研究[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 76–83. [Dong Xue, Hao Yuguang, Xin Zhiming, et al. Comparative study on sand-fixing capability of three typical shrubs in Otindag sandy land[J]. Forest Research, 2020, 33(1): 76–83.]

[36] 刘红梅, 吕世杰, 刘青泉, 等. 巴丹吉林沙漠东缘主要植物种群空间分布关系[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 959–967. [Liu Hongmei, Lv Shijie, Liu Qingquan, et al. Spatial distribution relations of main plant populations in eastern Badain Jaran Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 959–967.]

Numerical simulation study on the influence of dry *Alhagi camelorum* on the wind-sand flow field

LIU Jinmiao[1], LI Juyan[2], YIN Zhongdong[1], GUAN Hanxiao[3], ZHANG Jiawei[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Xinjiang General Ecological Environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. School of Life and Geography, Kashi University, Kashi 844000, Xinjiang, China)

Abstract: One of the important measures to control sand disasters in western desert areas is sand fixation by plants. As a typical desert plant, *Alhagi camelorum* has important application value. Based on the flow field in the spring, 30 cm of dry *Alhagi camelorum* was the object of research in this paper. To analyze the characteristics of wind speed and sand deposition, a numerical simulation was used via the fluent and field tests. The results were as follows: (1) the wind-sand flow can be roughly divided into the areas of blocked deceleration, lifting acceleration, turbulent deceleration, and recovery when going through the plant. A weak vortex forms behind the plant, and the height of the recirculation region is related to the distance from the plant. However, they are less than 0.14 m. (2) When the wind speed is 6 $m\cdot s^{-1}$, plants at a height of 30 cm mainly affect the horizontal wind speed below a height of 0.6 m. The horizontal wind speed at a certain distance behind the plant no longer presents a strict logarithmic distribution with height, but there are two minima, and the acceleration increases rapidly in the height range of 0.3−0.6 m. (3) The windproof efficiency of plants decreases with the increase of wind speed, and this phenomenon becomes more and more obvious the height increases. When the wind speed increases from 6 to 10 $m\cdot s^{-1}$, the windproof efficiency at a height of 0.3 m within a distance of 5.3 m behind the plant decreases from 40% to 16.56%. (4) The sand accumulation near the plant is different due to the different wind speed. When the wind speed of the incoming flow is low, sand accumulation is mainly concentrated near the front of the plant and within the range between plants. As wind speed increases, sand accumulation moves backward.

Keywords: sand-fixing service; flow field distribution; numerical simulation; *Alhagi camelorum*; vortex